

НВТОРЕФ М
175

проф. Гушаку И.В.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Для служебного пользования

Экз. № 100041

На правах рукописи

УДК 536.25.001.24.621.396.6

Ломонов Александр Фёдорович

СОПРЯЖЕННАЯ ЗАДАЧА СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО
ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ ЦЕЛЕВЫХ КАНАЛОВ КАССЕТНОЙ
РЭА ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ

Специальность 05.14.05 "Теоретические основы теплотехники"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на предприятии п/я Г-4371.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Горохов С.М.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Коноплёв И.Д.

кандидат технических наук,
доцент Сигалов А.В.

Ведущее предприятие указано в решении специализированного совета.

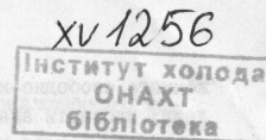
Защита диссертации состоится "14" декабря 1987 г.
в 14.00 часов на заседании специализированного совета
К.068.27.01 при Одесском технологическом институте
холодильной промышленности по адресу:
270057, г.Одесса, ул. Петра Великого 1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "12" ноября 1987 г.

Учёный секретарь

Р.К. Никульшин



Настоящая диссертация посвящена разработке метода решения сопряжённой задачи и исследованию с его помощью основных физических закономерностей свободно-конвективного течения воздуха и теплообмена в наборе пластин, образующих систему щелевых каналов, и вертикальной пластины в неограниченном пространстве при произвольном размещении источников тепловыделений применительно к общей тепловой модели кассетной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а также внедрению полученных результатов в практику её проектирования.

Актуальность проблемы. Актуальность детального исследования тепловых режимов тесно связана с проблемами конструирования и создания надёжной аппаратуры. Решение такой комплексной задачи на современном этапе осуществляется на основе системного подхода с применением средств автоматизированного проектирования, что в свою очередь диктует необходимость применения гибких и достоверных методов моделирования. Физическая нестрогость граничных условий третьего рода, применения граничных условий первого и второго рода обусловили в настоящее время повышенный интерес к сопряжённой постановке при решении задач конвективного теплообмена в различных тепловыделяющих системах и устройствах.

Цель и задачи исследования. Основным направлением исследований является разработка метода решения сопряжённой задачи свободно-конвективного теплообмена на вертикальных произвольно теплонегруженных поверхностях и определение с его помощью основных физических закономерностей течения воздуха и теплообмена в системе щелевых каналов и пластины конечных размеров в неограниченном пространстве, разработка алгоритмов теплофизического моделирования кассетной РЭА в условиях естественной вентиляции.

При этом необходимо: провести анализ объекта моделирования и на его основе схематизировать процесс теплообмена; ввиду сложности решения задачи в целом, выделить элементарную тепловую модель, являющуюся существенным фрагментом конструкции, которому присущи все основные особенности процесса теплообмена общей тепловой модели; сформулировать математическую модель сопряжённой задачи свободно-конвективного теплообмена произвольно теплонегруженной пластины в неограниченном пространстве и системе щелевых вертикальных каналов; сформулировать математическую модель сопря-

жённого свободно-конвективного теплообмена в общей тепловой модели; провести анализ влияния поперечной и осевой теплопроводности печатных плат на процесс теплообмена; установить условия и границы применимости полученных решений; разработать алгоритм моделирования теплового режима различных конструктивно-технологических уровней (КТУ) кассетной РЭА; оценить погрешность разработанного алгоритма и полученных решений на основе экспериментальных данных и других методов решения.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались аналитические и численные методы математической физики для решения задач теплопроводности и конвективного теплообмена, методы системного анализа, экспериментальные методы исследования теплового режима физических объектов, основные методы и современные принципы построения систем моделирования и организации проектных расчётов.

Научная новизна. Предложены и обоснованы тепловые модели и метод решения задачи сопряжённого свободно-конвективного теплообмена вертикальной пластины в неограниченном пространстве и системе щелевых каналов кассетной РЭА при произвольном распределении тепловыделений, а именно:

проведен анализ и установлены основные закономерности свободно-конвективного теплообмена в системе щелевых каналов и пластины конечных размеров при произвольном соотношении тепловых нагрузок их поверхностей на основе математической модели сопряжённого теплообмена;

проведен анализ погрешности, возникающей при рассмотрении теплового режима системы каналов с использованием граничных условий третьего рода, без учёта взаимовлияния условий теплообмена в каналах;

получены критериальные соотношения для определения необходимости решения задачи теплообмена в сопряжённой постановке и возможности рассмотрения её традиционными методами в зависимости от заданной погрешности расчёта;

получено расчётное соотношение для определения границ турбулизирующего воздействия микросхем на воздушный поток в канале;

разработан и обоснован метод численного моделирования теплового режима кассетной РЭА при естественной вентиляции, основанный на иерархическом построении конструкций и поэтапном методе моделирования: от шкафа до микросхем и микросборки. Дан

анализ принятых допущений и оценка погрешности предложенного метода.

Научные положения, защищаемые в работе. Разработанное математическое обеспечение позволяет подойти к решению задачи свободно-конвективного теплообмена в кассетной РЭА физически обоснованно, исключая необходимость априорного задания закона изменения температуры, тепловой мощности, коэффициентов теплоотдачи.

Полученные выражения для определения длины пути смешения и условий необходимости рассмотрения задачи в сопряжённой постановке по заданной погрешности расчёта позволяют осуществить обоснованный выбор математических моделей на разных этапах процесса моделирования теплового режима РЭА при естественной вентиляции.

Выбор элементарного фрагмента расчётной сеточной схемы в виде пластины с двумя поверхностными источниками тепла, служащей общей стенкой двух щелевых каналов или находящейся в теплообмене со свободным пространством, явился эффективным средством для получения дискретного аналога при численной реализации решения сопряжённой задачи теплообмена в кассетной РЭА различных КТУ.

Основные научные результаты, полученные в работе.

В результате численного и натурального эксперимента установлено сильное взаимное влияние процессов свободно-конвективного теплообмена через общие стенки соседних каналов и различие условий теплообмена по высоте стенок.

Применяемые до настоящего времени расчётные соотношения для определения коэффициентов теплоотдачи могут быть получены как частный случай, из предложенного решения при равенстве тепловых нагрузок и симметрии прочих характеристик тепловой модели.

Существующая в настоящее время практика использования расчётных соотношений, полученных экспериментально или теоретически без учёта реального распределения тепловой нагрузки, приводит к погрешности от 0 до 200% при определении характеристик интенсивности теплообмена для изменения соотношения мощностей тепловыделений от 1 до 40 по поперечной координате $-Y$.

Анализ температурного поля стенки при различных значениях отношения теплопроводности стенки по оси Z к её толщине показал, что в диапазоне изменения этого отношения от $5 \cdot 10^2$ до 10^2 Вт/м² К с погрешностью 5-6% можно считать, что тепловыделения

локализуются в районе установочного места соответствующего радиоэлемента.

Существующие в настоящее время критерии сопряжённости автомодельны по отношению к источникам тепла на поверхностях теплообмена и непригодны для условий свободно-конвективного теплообмена. Необходимость решения задачи свободной конвекции в сопряжённой постановке определяется с помощью полученных в работе критериальных соотношений в зависимости от заданной погрешности расчёта.

Разработанный численный метод решения задачи теплообмена и программное обеспечение, его реализующее, обеспечивает автоматизированное моделирование теплового режима РЗА кассетной конструкции, физически обоснованное и с приемлемой для практических целей погрешностью.

Практическая ценность работы. Предложенное математическое обеспечение применяется для проведения численных экспериментов по изучению процесса свободно-конвективного теплообмена в РЗА и позволяет конструктору выбрать наиболее приемлемый вариант компоновки, максимально отвечающий требованиям технического задания на проектирование.

Реализация в промышленности. Программное обеспечение, разработанное на основе предложенного метода и алгоритмов моделирования, в качестве составной части "ПРАМ-9" прошло опытную эксплуатацию в Одесском НИИ, Московском НПО и в настоящее время принято к промышленному тиражированию и эксплуатации отраслевым фондом алгоритмов и программ, в качестве самостоятельного программного комплекса "РАСКЕТ" внедрено на двух Ленинградских НПО.

Годовой экономический эффект от внедрения и техническая целесообразность промышленной эксплуатации указанного программного обеспечения подтверждается расчётом и соответствующими актами.

Апробация работы. Основное содержание работы докладывалось на отраслевой конференции руководителей тепловых служб - март 1984 года, г.Одесса, заседаниях секции "Автоматизированные системы моделирования" НТС предприятия, Всесоюзном совещании-семинаре НТОРЭС им.Попова по вопросам надёжности - октябрь 1985 года, г.Одесса.

Публикации. Основное содержание работы отражено в пяти печатных работах и трёх отчётах по НИР и ОКР.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, изложенных на 133 страницах машинописного текста, пяти приложений и списка литературы из 84 наименований. Работа вклю-

чает 44 рисунка и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, показана научная новизна и практическая ценность, изложен порядок рассмотрения вопросов.

В первой главе проведён анализ методов моделирования свободно-конвективного теплообмена в каналах и неограниченном пространстве, используемых в настоящее время. Указано, что наиболее общим и строгим при математической постановке задачи теплообмена является использование граничных условий 4-го рода, состоящих в соблюдении равенства температур и плотностей тепловых потоков на поверхностях теплообмена. Так как в настоящее время методы решения уравнений теплопроводности развиты сравнительно хорошо, основное внимание уделено рассмотрению аналитических и численных методов решения уравнений стационарного пограничного слоя. Отмечается, что наиболее рациональным при решении сопряжённых задач является подход, предложенный Лыковым А.В., заключающийся во введении на границе сопряжения неизвестной функции, равной температуре или тепловому потоку на этой границе. Это позволяет свести систему уравнений к двум "несвязным" задачам. Неизвестная функция в дальнейшем определяется из условий сопряжения.

Решающим фактором внедрения математических методов в практику теплофизического проектирования РЗА является широкое применение ЭВМ. Основным направлением в применении ЭВМ на современном этапе в этой области является разработка САПР. Укрупнённо отмечаются два основных направления работ при автоматизации теплофизического проектирования РЗА, связанные с созданием методического обеспечения САПР. Наряду с рассмотрением вопросов разработки машинно-ориентированных моделей, в качестве второго направления рассматривается разработка средств и методов, обеспечивающих эффективное использование указанных моделей в процессе теплофизического проектирования. Внимание акцентируется на методе поэтапного моделирования, предложенного Дульневским Г.Н. Метод заключается в проведении моделирования, начиная с высшего уровня иерархии конструкции, и далее последовательно, с требуемой степенью детализации, низших уровней.

Так как конечной целью теплового моделирования РЗА является определение теплового режима элементов: микросхем и микросборок, его соответствия заданным максимально допустимым значениям,

рассматривается современное состояние этого вопроса. Указывается на необходимость применения для исследования теплового режима микросборок и микросхем моделей, максимально приближенных к реальным условиям передачи тепла в них.

Во второй главе проводится формализация процесса теплообмена и рассмотрение общей тепловой модели как совокупности вертикально ориентированных пластин, на которых с одной или двух сторон расположены тепловыделяющие радиоэлементы. Между пластинами имеются сквозные разомкнутые вертикальные каналы, по которым движется воздух. При этом, как правило, на первой и n -ой пластинах, являющихся стенками корпуса, источники тепла отсутствуют и с внешних сторон они находятся в теплообмене со свободным пространством (рис.1). Установленные на поверхностях пластины радиоэлементы при определенных условиях вызывают турбулизию потока. Суть предлагаемого численного решения задачи теплообмена в общей тепловой модели состоит в разбиении её сеткой на элементарные области и замене непрерывной информации, содержащейся в точном решении дифференциальных уравнений, дискретными значениями в узлах сетки. В качестве метода построения расчётной схемы используется интегро-интерполяционный метод. Одним из важнейших свойств рассматриваемого метода является то, что в нём заложено точное интегральное сохранение таких величин, как масса, количество движения и энергия на любой группе элементарных фрагментов и на всей расчётной области при любом количестве шагов разбиения.

Далее осуществляется переход к описанию тепловой модели элементарного фрагмента, являющегося существенной составной частью рассматриваемой общей тепловой модели. В качестве такой элементарной тепловой модели рассматривается вертикально ориентированная пластина, находящаяся в теплообмене с неограниченным пространством (рис.2) или являющаяся общей стенкой двух вертикальных щелевых каналов (рис.3). На обеих поверхностях пластины и стенках каналов расположены тепловыделяющие радиоэлементы, образующие нагретые зоны. За нагретую зону принимается параллелепипед площадь основания его совпадает с площадью боковой поверхности пластины, а высота равна средней высоте смонтированных на ней деталей. Заданы размеры каналов, значения удельных тепловых потоков

Q_3, Q_4 на поверхностях внешних стенок и удельных тепловых нагрузок P_1, P_2 на поверхностях пластины. Тепловые потоки q_1, q_2, q_3, q_4 на торцах пластины и потоки Q_3, Q_4 используются

Тепловая модель системы n - I каналов,
внешние стенки которой находятся
в теплообмене со свободным пространством

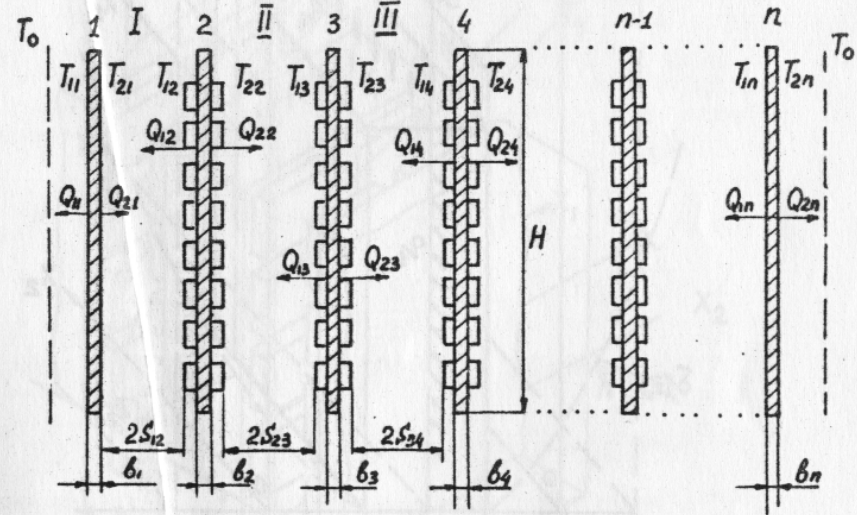


Рис.1

в дальнейшем для построения общей тепловой модели из фрагментов.

Необходимо определить значения температур поверхностей пластины T_1, T_2 и потоков Q_1, Q_2 , уносимых конвекцией с поверхностей пластины.

В качестве математической модели процесса теплообмена рассматривается система четырёх дифференциальных уравнений:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad ; \quad (1)$$

$$\rho_{fi} (\mu_{zi} \frac{\partial u_{zi}}{\partial z_i} + \mu_{yi} \frac{\partial u_{yi}}{\partial y_i}) = \rho_{fi} g \beta (T_{fi} - T_{\theta xi}) - \rho_{fi} \tau_i \quad ; \quad (2)$$

$$\mu_{zi} \frac{\partial T_{fi}}{\partial z_i} + \mu_{yi} \frac{\partial T_{fi}}{\partial y_i} = \alpha_{fi} \frac{\partial^2 T_{fi}}{\partial y_i^2} \quad ; \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_{zi}}{\partial z_i} + \frac{\partial u_{yi}}{\partial y_i} = 0 \quad ; \quad (4)$$

$$\tau_i = \rho_{fi} l_i^2 \left(\frac{\partial u_{zi}}{\partial y_i} \right)^2 ;$$

Для ламинарного пограничного слоя уравнение (2) запишется в виде:

$$\rho_{fi} (\mu_{zi} \frac{\partial u_{zi}}{\partial z_i} + \mu_{yi} \frac{\partial u_{yi}}{\partial y_i}) = \rho_{fi} \frac{\partial^2 u_{zi}}{\partial y_i^2} + \beta_i g \rho_{fi} (T_{fi} - T_{\theta xi}) \quad ; \quad (5)$$

Граничные условия рассматриваемой модели с учётом излучения запишутся в виде:

$$\lambda_{f1} \frac{\partial T_{f1}}{\partial y_1} / y_1 = s_1 = \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} / y = \frac{\rho}{2} + P_1 - \sigma_n \epsilon_n [T_1^4(xz) - T_3^4(xz)] ;$$

$$-\lambda_{f2} \frac{\partial T_{f2}}{\partial y_2} / y_2 = -s_2 = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} / y = \frac{\rho}{2} + P_2 + \sigma_n \epsilon_n [T_4^4(xz) - T_2^4(xz)] ;$$

$$T_{f1} / y_1 = -s_1 = T_3(xz) ; T_{f1} / y_1 = s_1 = T_1(xz) ;$$

$$T_{f2} / y_2 = -s_2 = T_2(xz) ; T_{f2} / y_2 = s_2 = T_4(xz) ;$$

$$-\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} / x = \alpha_2 = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} / x = \alpha_1 ; -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} / z = \alpha_3 = -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} / z = \alpha_4 ;$$

$$\lambda_{f1} \frac{\partial T_{f1}}{\partial y_1} / y_1 = -s_1 = Q_3 ; \lambda_{f2} \frac{\partial T_{f2}}{\partial y_2} / y_2 = s_2 = Q_4 ;$$

$$T_{f1} / z_1 = 0 = T_{\theta x} \quad ; \quad T_{f2} / z_2 = 0 = T_{\theta x_2} \quad ;$$

$$\text{при } y_i = \pm s_i \quad \text{и } z_i > 0 \quad u_{zi} = 0 ; u_{yi} = 0 ;$$

Граничные условия математической модели для теплообмена пластины в неограниченном пространстве с учётом допущения о равенстве толщин динамического и теплового пограничного слоёв запишутся:

$$\lambda_{f1} \frac{\partial T_{f1}}{\partial y_1} / y_1 = s_1 = \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} / y = \frac{\rho}{2} + P_1 - \sigma_n \epsilon_n [T_1^4(xz) - T_0^4] ;$$

$$-\lambda_{f2} \frac{\partial T_{f2}}{\partial y_2} / y_2 = -s_2 = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} / y = \frac{\rho}{2} - P_2 + \sigma_n \epsilon_n [T_2^4(xz) - T_0^4] ;$$

$$-\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} / x = \alpha_2 = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} / x = \alpha_1 ; -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} / z = \alpha_3 = -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} / z = \alpha_4 ;$$

$$T_{f1} / y_1 = s_1 = T_1(xz) ; T_{f2} / y_2 = -s_2 = T_2(xz) ;$$

$$T_{f1} / z_1 = 0 = T_{f2} / z_2 = 0 = T_0 ; T_{f1} / y_1 = -s_1 = T_{f2} / y_2 = s_2 = T_0 ;$$

$$\text{при } y_i = \pm \delta_i \quad \text{и } z_i > 0 \quad u_{zi} = u_{yi} = 0 \\ z_i \leq 0 \quad u_{zi} = 0 ; u_{yi} = 0$$

Решение осуществляется с использованием следующих аппроксимирующих профилей: кусочно-линейного для температуры поверхностей теплообмена, степенного для температуры движущегося воздуха и параболического или логарифмического для скорости воздуха.

В результате системы дифференциальных уравнений сводится к дискретному аналогу, представляющему собой в конечном итоге

систему четырех алгебраических уравнений относительно неизвестных T_1, T_2, Q_1, Q_2 , с четырьмя нелинейными членами Pe_1, Pe_2 - критериями Пекле и двумя членами, характеризующими лучистый теплообмен. Система уравнений решается методом прямой итерации. Сходимость цикла обеспечивается за 10-15 сек процессорного времени на ЭВМ ЕС-1022. На основе полученного решения и экспериментальных данных, а также закона аэродинамического сопротивления для каналов с шероховатыми стенками, выведено расчетное соотношение для определения среднего значения длины пути перемешивания воздуха. Полученное соотношение позволяет определить закон движения воздуха в канале, пользуясь его геометрическими размерами, высотой и формой корпусов радиоэлементов.

С помощью полученного решения проведена оценка погрешности расчета критерия Нуссельта и температуры поверхностей ячейки, являющейся общей стенкой двух щелевых каналов РЭА при пренебрежении поперечной теплопроводностью печатной платы и перетоком тепловой мощности из канала в канал. При этом значение относительной погрешности может достигать значений от 0 до 200 % при изменении отношения P_1/P_2 от 1 до 40 - для критерия Нуссельта и от 0 до 80 % при изменении отношения теплопроводности печатной платы к ее толщине от 0 до 10^3 Вт/м²К - температуры. На основе аппроксимации результатов решения задачи сопряженного свободно-конвективного теплообмена пластины в неограниченном пространстве получены расчетные соотношения для оценки возможности рассмотрения задачи "традиционными" методами по заданной относительной погрешности расчета.

В третьей главе при помощи полученного решения задачи сопряженного теплообмена для тепловой модели элементарного фрагмента рассмотрено влияние осевой (совпадающей с направлением движения воздуха) теплопроводности на теплообмен пластины в свободном пространстве при произвольной тепловой нагрузке ее поверхностей. Проведено сопоставление результатов решения с результатами экспериментов и численного решения Зинниса при одинаковой нагрузке поверхностей пластины, как частного случая рассматриваемого в данной работе решения. Анализ температурного поля пластины при различных значениях отношения теплопроводности пластины по оси Z - λ_z к толщине (с учетом того, что толщина печатных плат $2-3 \cdot 10^{-3}$ м) показал, что в диапазоне изменения этого отношения от $5 \cdot 10^2$ до 10^3 Вт/м²К с погрешностью 5-6 % можно считать, что тепловыделения локализируются в районе установочного места соответствующего радиоэлемента. При значениях этого отношения более 10^3 Вт/м²К необхо-

дим детальный учет растекания тепла по поверхности печатной платы в направлении осей Z и X .

Далее, с использованием решения для элементарного фрагмента, рассматривается сеточная схема и метод моделирования теплового режима системы n - I вертикальных каналов.

Моделирование осуществляется в несколько этапов. На первом этапе используется максимальная грубая сетка - по одному шагу разбиения по осям Z и X равным высоте конструкции H и глубине d , соответственно, и $2n$ шагов по оси Y (где n - количество пластин). На основе результатов решения задачи сопряженного теплообмена для двух вертикальных каналов и пластины в свободном пространстве записывается система $4n$ уравнений (по четыре для каждой пластины), связывающих между собой значения температур и тепловых конвективных потоков.

В результате решения системы уравнений получаются значения критериев Пекле в каналах: Pe_n и Pe_{n-1} . При расчете используется итерационный цикл, с помощью которого учитываются местные сопротивления в каналах и перфорация дна и крышки корпуса.

На следующем этапе решается та же система уравнений последовательно, начиная с нижнего, для каждого шага разбиения по оси Z при значениях Pe_n и Pe_{n-1} , полученных ранее. При этом в качестве высоты берется шаг разбиения по оси Z , значения удельной тепловой нагрузки - удельная тепловая нагрузка на рассматриваемой участке (ряде установки микросхем). После каждого цикла расчета определяются значения температуры воздуха, выходящего из предыдущего и входящего в последующий фрагмент разбиения по высоте. Затем, если необходимо, производится разбиение поверхности ячеек сеткой, содержащей m шагов по оси X и j - по оси Z . Для каждого элементарного фрагмента записывается система 4-х уравнений, начиная с m -го при фиксированном значении j - (последовательно, начиная с $j = 1$). При этом в качестве значений температуры воздуха, входящего в соответствующий шаг разбиения по высоте, используются результаты расчета предыдущего этапа.

Величины потоков на торцах фрагмента расчетной сеточной схемы задаются с помощью кусочно-линейной аппроксимации. Теплопроводности на границах контакта фрагментов определяются как среднее гармоническое их теплопроводностей по соответствующим осям. Система уравнений решается итерационным применением метода Гаусса.

Результаты расчета сопоставлялись с результатами экспериментальных исследований теплового режима типового шкафа К-75

фирмы БВС (ФРГ), komponуемого из одностаяных блоков кассетной конструкции, содержащих по 21 ячейке в каждом. Результаты расчетов оформлялись в виде графиков зависимостей между наибольшей нагрузкой на ячейку (при максимально допустимом перегреве поверхности ячейки относительно окружающей среды 40 К) и минимально допустимым зазором между ячейками. В качестве параметра использовалось количество этажей конструкции. Среднеквадратичная погрешность совпадения результатов расчета с экспериментальными данными составила 8 %.

В четвертой главе проведено экспериментальное исследование стационарного теплового режима кассетной РЭА в условиях естественной вентиляции, цель которого состояла в изучении перераспределения тепла между ячейками при неравномерной тепловой нагрузке их поверхностей, выявлении характера температурного поля конструкции при различных вариантах тепловой нагрузки ячеек, обосновании и оценке принятых при разработке алгоритма моделирования допущений, оценке погрешности разработанных численных методов моделирования.

Экспериментальные исследования проводились на макете, изготовленном с использованием блока самолетной РЭА, где в ячейках с двухсторонним печатным монтажом были установлены имитаторы микросхем в корпусах реальной конструкции. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по распределению максимальных перегревов микросхем по высоте ячеек, показало, что при доверительной вероятности %, 99 и размере выборки 276 доверительный интервал для средней относительной погрешности составляет минус $1,91 \% \leq \Delta \bar{v} \leq 0,49 \%$. Средне-квадратичная погрешность $\sigma = 6 \%$. При оценке погрешности расчета среднеповерхностных температур ячеек для различных вариантов распределения нагрузок при доверительной вероятности 0,99 и размере выборки 330 доверительный интервал для средней относительной погрешности составил минус $1,22 \% \leq \Delta \bar{v} \leq 0,6 \%$, среднеквадратичная погрешность $\sigma = 6,6 \%$.

Экспериментальное исследование теплового режима микросборок, установленных на печатную плату, осуществлялось при помощи имитатора, изготовленного с использованием корпуса И57.29-1.

Измерялась температура центра основания и крышки корпуса. Доверительный интервал для средней относительной погрешности совпадения экспериментальных данных и результатов моделирования при доверительной вероятности 0,99 при размере выборки 24 составил: минус $0,19 \% \leq \Delta \bar{v} \leq 5,5 \%$. Среднеквадратичная погрешность

$\sigma = 5,2 \%$. Таким образом, экспериментальное исследование температурных полей кассетной РЭА при естественной вентиляции показало, что использование разработанного численного метода позволяет проводить детальный анализ теплового режима с удовлетворительной для решения задач автоматизации теплового моделирования погрешностью. Оцененная по результатам эксперимента методическая погрешность моделирования составляет 17%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

1. Наиболее строгими и физически обоснованными при математической постановке задачи свободно-конвективного теплообмена в РЭА кассетной конструкции являются граничные условия четвертого рода.
2. Анализ математических методов решения задач теплообмена в РЭА указывает на целесообразность численного решения задач теплообмена в сопряженной постановке на основе интегро-интерполяционного метода, метода контрольного объема, интегральных методов решения уравнений пограничного слоя.
3. В качестве методической основы построения алгоритма моделирования теплового режима кассетной РЭА наиболее приемлемо использование поэтапного метода.
4. Экспериментальное и численное исследование процесса свободно-конвективного теплообмена в кассетной РЭА показало существенное влияние на тепловой режим перераспределения тепловых потоков в конструкции за счет поперечной теплопроводности и различие условий теплообмена по высоте ячеек, вплоть до инверсии направления тепловых потоков. Это указывает на неприемлемость, в общем случае, существующей практики априорного задания условий на поверхностях теплообмена при исследовании теплового режима кассетной РЭА.
5. Относительная погрешность, возникающая при рассмотрении указанной задачи на основе "традиционного" подхода, без учета поперечной теплопроводности стенки и взаимовлияния условий теплообмена на ее поверхностях растёт по мере увеличения несимметрии тепловой нагрузки и теплопроводности ячеек.
6. Проведенное численное исследование температурных режимов РЭА и сопоставление его результатов с результатами эксперимента показало достаточно высокую эффективность и достоверность предложенного метода моделирования.

XV 1256
 ИНСТИТУТ ХОЛОДА
 ОНАХТ
 Библиотека

Основное содержание работы опубликовано в статьях:

1. Горохов С.М., Ломонов А.Ф. Приближенное решение стационарной задачи сопряженного теплообмена при свободной конвекции в вертикальных каналах РЗА. // Вопросы радиоэлектроники.-1983.-сер.ТРТ0.-вып.3.- С. 93-104.
2. Ломонов А.Ф., Горохов С.М., Зюганов П.Ю. Приближенное решение стационарной задачи сопряженного теплообмена ограниченной пластины при свободной конвекции. // Вопросы радиоэлектроники.-1984.сер.ТРТ0.-вып.1.- С.113-120.
3. Бодарев А.Д., Ломонов А.Ф., Фролова Е.А. Моделирование теплового режима корпусных микросборок с помощью ЭВМ. // Вопросы радиоэлектроники.-1984.-сер.ТРТ0.-вып.2.- С.3-10.
4. Ломонов А.Ф., Зюганов П.Ю. Приближенное решение стационарной задачи сопряженного теплообмена при принудительном воздушном охлаждении в вертикальных щелевых каналах РЗА кассетной конструкции. // Вопросы радиоэлектроники.-1985.-сер.ТРТ0.-вып.2.- С. 92-101.
5. Горохов С.М., Зюганов П.Ю., Камкина С.В., Костюрина М.С. Ломонов А.Ф., Салова Л.Н. Пакет прикладных программ моделирования тепловых режимов кассетной РЗА в условиях охлаждения естественной конвекцией. // Вопросы радиоэлектроники.-1986.-сер.ОВР.-вып.9.- С. 23-25.

Условные обозначения:

T - температура; 2δ - осредненное по оси Z значение толщины пограничного слоя; τ - напряжение турбулентного трения; ρ - плотность; l - длина пути смешения; β - коэффициент объемного расширения; λ - теплопроводность; u - скорость движения воздуха; g - ускорение силы тяжести; α - температуропроводность; ϵ_n - приведенная степень черноты поверхностей; ν - кинематическая вязкость; $\delta(z)$ - толщина пограничного слоя; $\sigma_n = 5,673 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴.

Индексы при условных обозначениях:

f - воздух; X, Y, Z - составляющие величины по соответствующей координате; $i = 1, 2$ - для левой и правой поверхности пластины, левого и правого каналов соответственно; vx - значение величины на входе в канал.

